

稻草与生石灰添加介导的温室内土壤团聚体稳定性及碳分布特性

张玥琦, 孙雪, 张国显, 赵凤艳, 张天实, 周崇峻, 杨丽娟

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘要: 土壤中稳定的团聚体为碳的固定提供良好的物理保护, 同时土壤中的碳又会促进团粒结构的形成, 二者相辅相成, 但在长期稻草和生石灰添加介导的设施内土壤中二者如何变化, 却少见报导。以长期施肥定位试验为依托, 采用湿筛法研究了施用鸡粪(M)的基础上, 配施稻草(R)和生石灰(Ca)对设施土壤团聚体组成、稳定性及碳分布的影响, 以不施肥(CK)为对照。结果表明: (1) 在鸡粪基础上加入稻草(MR)或生石灰(MCa), 与单施鸡粪(M)相比, >0.25 mm 团聚体含量分别增加了 123% 和 37%; 稻草和生石灰同时添加可显著增加 5~2 mm 大团聚体含量, 较 MR、MCa、M 分别提高 12%, 59%, 141%。(2) 在鸡粪基础上施入稻草或生石灰均可增加 MWD、GMD、 $R_{0.25}$, 提高团聚体的稳定性, 其中 MR 处理最高, MRCa 处理次之, 二者均显著高于 MCa、M、CK 处理。(3) 在鸡粪基础上加入稻草或生石灰, 均可提高土壤全碳含量, 其中 MRCa 处理最高, 较 MR、MCa、M 分别增加 20%, 40%, 55%; 稻草和生石灰同时施入可显著增加 5~2 mm 大团聚体中碳含量; 加入生石灰可增加 0.5~0.25 mm 团聚体中碳含量; 施入稻草或生石灰均可显著增加 >0.25 mm 团聚体中的碳对土壤全碳的贡献。(4) 土壤全碳含量与 5~2、2~1、1~0.5 mm 团聚体含量呈显著正相关, 与 <0.25 mm 微团聚体含量呈显著负相关; MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 均与 >0.25 mm 团聚体含量呈显著正相关, 与 <0.25 mm 微团聚体含量呈显著负相关。设施土壤在施入鸡粪的基础上同时加入稻草和生石灰, 可改善土壤结构, 提高土壤碳水平, 有利于缓解设施生产中因长期连作所导致的土壤结构劣变问题。

关键词: 温室土壤; 稻草; 生石灰; 水稳性团聚体; 土壤全碳

中图分类号: S158.3; S152.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)03-0199-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.031

Soil Aggregation and Total Carbon Distribution in Soil Amended with Straw and Lime of Greenhouse

ZHANG Yueqi, SUN Xue, ZHANG Guoxian, ZHAO Fengyan,

ZHANG Tianshi, ZHOU Chongjun, YANG Lijuan

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: The stability of soil aggregates provide physical protection for soil carbon, while soil carbon promotes the formation of soil aggregates. To evaluate the effects of long-term straw and quicklime application on soil aggregates stability and total carbon (TC) accumulation at aggregate, soils from plots amended with M (chicken manure), MR (chicken manure + straw), MCa (chicken manure + quicklime), MRCa (chicken manure + straw + quicklime) were collected compared with CK (no-fertilizer). Soil was separated into five size fractions (5~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, <0.25 mm) by wet-sieving. The results showed as follows: (1) Straw return or liming increased the distribution of >0.25 mm size fractions, MR and MCa caused 123% and 37% increase relative to the M, respectively; while application of straw and quicklime together had a significant effect on the distribution of 5~2 mm size fraction, compared with MR, MCa and M, the MRCa caused 12%, 59% and 141% increase, respectively. (2) Application of straw and quicklime could increase the MWD, GMD and $R_{0.25}$. MR treatment had the highest MWD, GMD and $R_{0.25}$, followed by the MRCa treatment, MR and MRCa were significantly higher than those of MCa, M and CK. (3) Addition of straw and quicklime could increase the TC content, compared with MR, MCa and M, MRCa caused 20%,

收稿日期: 2018-01-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201004); 国家自然科学基金项目(31372132); 沈阳农业大学博士启动基金项目(880416043)

第一作者: 张玥琦(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤养分高效利用研究。E-mail: syau_zyq@163.com

通信作者: 杨丽娟(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事养分管理与资源高效利用研究。E-mail: syau_ylj@163.com

40% and 55% increase, respectively; straw return and liming significantly increased the TC content of 5~2 mm size fraction; liming could increase the TC content of 0.5~0.25 mm size fraction; both straw and lime could significantly increase the contribution of TC in the >0.25 mm size fractions to the bulk soil TC. (4) TC content was positively correlated with the distribution of 5~2, 2~1, 1~0.5 mm size fractions, and negatively correlated with the distribution of <0.25 mm size fraction. MWD, GMD and $R_{0.25}$ were positively correlated with the distribution of >0.25 mm size fractions, and negatively correlated with the distribution of <0.25 mm size fraction. Therefore, straw return and liming could improve the soil structure and carbon level. These findings were beneficial to alleviate the problem of soil structural fission caused by long-term continuous cropping in the agricultural production of greenhouse.

Keywords: greenhouse soil; straw; quicklime; water-stable aggregate; TC content

近年来,设施农业由于其产值高、受季节影响小的特点发展迅猛,特别是在我国北方地区,为解决人们“菜篮子”问题做出了巨大的贡献。但常年高温、高湿、高蒸发量、无雨水淋溶的特性也给它带来许多问题,其中土壤质量退化是设施农业目前面临的最严重问题之一^[1]。土壤团聚体的数量和稳定性作为评价土壤质量和结构的重要指标,与土壤有机质有着密切的联系^[2]。稳定的团聚体有利于保护土壤碳库免受矿化分解^[3]。同时,土壤中的碳又促进团粒结构的形成、提高团聚体的稳定性,其在团聚体中的分布直接影响土壤的理化性质^[4]。施肥是影响土壤团聚体组成、稳定性以及碳分布的一个重要因素^[5]。有研究^[6]表明,长期施用鸡粪,可以改变土壤结构,使板结的土壤松化,增加透气性和保肥性。作物秸秆是我国重要的有机肥资源之一,储量丰富,秸秆还田可提高土壤肥力,改良土壤结构^[7]。钙是促进团聚体形成的主要胶结物质和作用力之一,可促进团聚体的形成^[8]。关于不同物料组合对土壤团聚体组成及碳分布的影响已成为近年来研究的热点,长期不同物料配施对耕层土壤 5~2 mm 大团聚体含量影响最大^[9],施用粪肥和稻草会显著促进水稳性大团聚体的形成,提高水稳性团聚体的稳定性^[10],还会提高水稳性团聚体中 C、N 的积累^[4]。

长期不同物料配施通过影响团聚体分布以及碳在团聚体中的分配比例而增加有机碳固定^[5]。

番茄作为我国设施栽培的主要品种之一,市场需求量大,复种指数高。长期以来,以高量投入化肥作为保障番茄在日益退化的设施土壤上持续增产的重要手段。高量投入化肥尽管保证了作物的产量,长此以往却严重威胁了设施土壤的健康。基于此,大量试验研究了不同物料组合对土壤结构及质量的影响,但秸秆与生石灰对土壤团聚体稳定性及碳分布特性的研究较少,尤其是针对设施内土壤的研究鲜有报道。本文以长期施肥定位试验为依托,采用湿筛法研究了施用鸡粪的基础上,配施稻草、生石灰、稻草与生石灰同时施入对设施土壤团聚体组成、稳定性及全碳分布的影响,为设施内土壤可持续利用和设施农业可持续发展提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在沈阳农业大学温室番茄长期施肥定位试验基地(2009 年建立,一年两茬)进行。供试土壤为棕壤,2009 年试验前原始土及 2016 年取样时土壤的基本理化性质见表 1。供试番茄品种为“金冠 9 号”。

表 1 供试土壤基本理化性质

	pH	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳酸钙/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
原始土	6.96	212	39.1	11.9	147	73.6	15.5	0.54	0.43	25.9
CK	7.74	132	25.2	23.1	162	87.8	17.5	1.41	0.30	24.6
M	7.09	310	65.6	157.0	416	79.7	21.6	1.92	0.94	23.2
MR	6.92	492	81.9	150.0	499	89.9	27.8	2.08	0.99	24.5
MCa	7.03	379	70.0	160.0	470	119.0	23.9	1.75	0.92	24.0
MRCa	7.23	563	78.5	146.0	473	98.3	33.4	2.07	1.25	24.2

本试验于 2016 年 9 月至 2017 年 1 月进行,处理为:CK(不施肥的对照)、M(单施鸡粪)、MR(鸡粪+稻草)、MCa(鸡粪+生石灰)、MRCa(鸡粪+稻草+生石灰)。每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区大 1 m×1.5 m,每小区定植 8 株苗。肥料施用量分别为腐熟鸡粪:3.75 kg/m²、稻草:1.44 kg/m²、生石

灰:30 g/m²、复合肥:45 g/m²(各肥料养分含量见表 2),化肥施用量主要依据辽宁省保护地生产常规用量。除 CK 外,所有处理均施用等量复合肥。鸡粪、稻草、生石灰、40%复合肥作为基肥一次性施入,剩余的 60%复合肥分别于番茄第 1 穗果、第 2 穗果膨大至直径 2 cm 时等量追施。

表2 稻草、鸡粪、生石灰、复合肥的养分含量

	全 N/ (g · kg ⁻¹)	全磷(P ₂ O ₅)/ (g · kg ⁻¹)	全钾(K ₂ O)/ (g · kg ⁻¹)	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	Ca/ (g · kg ⁻¹)	pH	EC/ (μS · cm ⁻¹)
稻草	9.80	1.60	6.30	395	10.6		
鸡粪	22.20	14.90	16.60	151	71.8	7.51	832
生石灰	0	0	0	0	685.0	13.60	729
复合肥	130.00	74.20	125.00	0	0	6.07	1879

注:稻草、鸡粪养分含量基于风干重。

1.2 测定项目及方法

于番茄盛果期(11月22日)用采样铲按照五点采样法采集耕层(0—20 cm)土壤于硬质塑料盒内,挑出稻草、根系、石子等杂物后自然风干,过5 mm筛,供水稳性团聚体筛分。土壤基本性质:pH(水:土=2.5:1,pH计)、EC(水:土=2.5:1,电导率仪)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷(碳酸氢钠浸提、火焰光度法)、速效钾(醋酸铵浸提、比色法)、全碳、全氮(EI-ementar III元素分析仪)、全磷(氢氧化钠熔融、比色法)、全钾(氢氧化钠熔融、火焰光度法)^[11]。

水稳性团聚体:Yoder湿筛法^[12]。用四分法取50 g过筛后的土壤,储存在铝盒中备用。不同孔径的筛子按孔径大小顺序(2,1,0.5,0.25 mm)放于振荡架上,并置于水桶中。将土样轻轻放入2 mm筛子中,湿润土壤3 min后启动湿筛仪,并控制其转速维持在30 r/min,上下振幅4 cm,振荡10 min。各级筛上的团聚体于烘箱中45℃烘干后称重,即得到5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 粒级团聚体质量。

$$\text{各粒级团聚体中碳对土壤全碳的贡献率(\%)} = \frac{\text{该粒级团聚体中碳含量} \times \text{该粒级团聚体的含量}\%}{\text{全土碳总量}} \quad (4)$$

1.3.2 统计分析 采用Excel 2013进行数据、图表处理,利用SPSS 17.0软件进行多因素方差分析、显著性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体的组成

由表3可知,添加稻草或生石灰均能显著增加5~2 mm大团聚体的含量,其中MRCa处理5~2 mm大团聚体含量最高,分别比MR、MCa、M提高12%,58%,141%。鸡粪+稻草可显著增加2~1,1~0.5,0.5~0.25 mm较大团聚体含量,对于2~1,1~0.5,0.5~0.25 mm较大团聚体来说,MR处理最高,MRCa处理次之,二者均显著高于MCa、M、CK。但对<0.25 mm微团聚体来说,添加稻草或生石灰则会降低其含量,其中MR较M降低24%,MCa较M降低12.5%。稻草与生石灰同时施入也会降低<0.25 mm微团聚体含量,MRCa显著低于MCa、M、CK。多因素方差分析表明,鸡粪+生石灰可显著增加5~2 mm大团聚体含量;鸡粪+稻草对5~2,

1.3 数据分析方法

1.3.1 计算方法 根据各粒级团聚体所占比例,计算平均重量直径(MWD,mm)、几何平均直径(GMD,mm)和>0.25 mm团聚体所占比例($R_{0.25}$,%)^[13-14]。计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n d_i \omega_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln d_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{MT > 0.25}{MT} \times 100\% \quad (3)$$

式中: d_i 为*i*粒级团聚体平均直径(mm); ω_i 为*i*粒级团聚体所占比例; m_i 为*i*粒级团聚体质量(g);MT为团聚体总质量(g)。

根据各粒级团聚体中碳含量、所占比例及土壤全碳含量,计算各粒级团聚体中碳在土壤全碳的贡献率^[15],计算公式为:

2~1,1~0.5,0.5~0.25 mm团聚体含量显著增加,对<0.25 mm团聚体含量显著降低;稻草和生石灰同时施入可显著增加2~1,0.5~0.25 mm团聚体含量,显著降低<0.25 mm团聚体含量。

2.2 土壤团聚体的稳定性

MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 均是评价团聚体稳定性的指标。MWD采用加权求和方法计算,GMD通过对团聚体直径取对数后加权求和计算,弱化了团聚体直径的影响程度,提高了团聚体含量的影响程度。MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 数值越大,团聚体越稳定。由表4可知,添加稻草和生石灰可显著增加MWD、GMD和 $R_{0.25}$,MRCa处理较M处理的MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 分别提高64%,41%,88%。鸡粪+稻草处理的MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 最高。鸡粪+生石灰处理可增加MWD、GMD和 $R_{0.25}$,MCa较M的MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 分别提高21%,12%和29%。多因素方差分析表明,鸡粪+稻草以及鸡粪+稻草+生石灰处理可显著提高MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 。

表 3 不同处理下土壤水稳性团聚体的组成

处理	各粒级水稳性团聚体占总团聚体的比例/%					
	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	
CK	1.67±0.33c	2.46±0.42c	6.97±1.14b	4.91±1.39bc	83.98±1.67a	
M	1.62±0.08c	2.98±0.06c	8.92±0.01b	3.19±0.03c	83.31±0.01a	
MR	3.48±0.21a	6.05±0.44a	19.17±1.49a	8.65±0.06a	62.66±1.64d	
MCA	2.46±0.01b	4.29±0.24b	10.09±0.85b	5.98±1.01ab	77.20±0.39b	
MRCa	3.91±0.11a	5.91±0.26a	16.31±2.35a	6.36±0.71ab	67.52±1.77c	
多因素方差分析	R	76.012***	55.170***	34.679***	12.274**	130.744***
	Ca	11.109**	3.433	0.364	0.090	0.222
	R*Ca	1.183	5.225*	2.081	9.266*	17.111**

注:表中数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);*表示在 $P<0.05$ 水平上显著;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著;***表示在 $P<0.001$ 水平上显著;R代表稻草,Ca代表氧化钙,R*Ca代表稻草与氧化钙的交互作用。下同。

表 4 不同处理下土壤水稳性团聚体的稳定性

处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}$
CK	0.27±0.02c	0.17±0.01c	0.16±0.02d
M	0.28±0.00c	0.17±0.00c	0.17±0.00d
MR	0.47±0.01a	0.25±0.01a	0.37±0.02a
MCA	0.34±0.00b	0.19±0.00b	0.23±0.00c
MRCa	0.46±0.01a	0.24±0.01a	0.32±0.02b
多因素方差分析	R	154.886***	115.366***
	Ca	4.394	0.152
	R*Ca	9.225*	9.864**
			17.111**

2.3 土壤全碳的含量

由图 1 可知,在鸡粪基础上施入稻草或生石灰,均能提高土壤全碳含量。其中 MRCa 处理土壤全碳含量最高,达到 19.39 g/kg,较 MR、MCA、M 处理分别提升 20%,40%,55%。鸡粪+稻草处理可显著提高土壤全碳含量,MR 较 M 提升 28%。鸡粪+生石灰处理也可提高土壤全碳含量,MCA 较 M 相比增加了 1.32 g/kg,但处理间无显著差异。

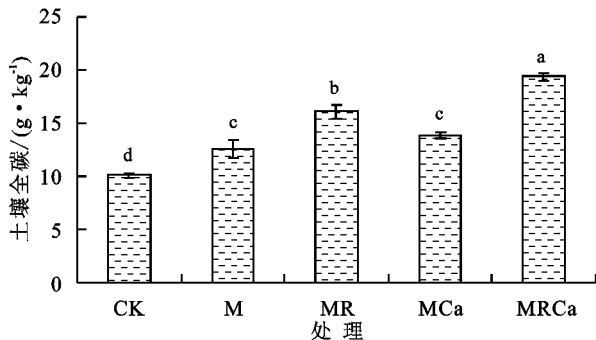


图 1 不同处理下土壤的全碳含量

2.4 土壤各粒级团聚体中的全碳含量及分配

2.4.1 各粒级团聚体中的全碳含量 由图 2 可知,整体来看,同一处理的不同粒级间比较,均是随着粒级的减小,全碳含量呈下降的趋势,5~2 mm 粒级全碳含量最高,<0.25 mm 粒级全碳含量最低。添加稻草或生石灰能显著提高 5~2 mm 团聚体中的全碳含量,其中 MRCa 处理的全碳含量最高,显著高于其他各处理。鸡粪+稻草处理可增加 5~2 mm 团聚体中碳含量,MR 较 M 提高 2%,但未达到差异显著性。鸡粪+生石灰处理未对 5~2 mm 团聚体含量产生影

响。稻草或生石灰施入未对 2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 粒级中全碳含量产生显著影响,同一粒级的不同处理之间比较,全碳含量均显著高于 CK,但处理间差异不显著,整体上随着物料种类的减少,全碳含量呈下降的趋势。对于 2~1,1~0.5 mm 粒级,除 CK 外,均是 MCA 处理全碳含量最低,但在 0.5~0.25 mm 粒级中 MCA 处理全碳含量最高。

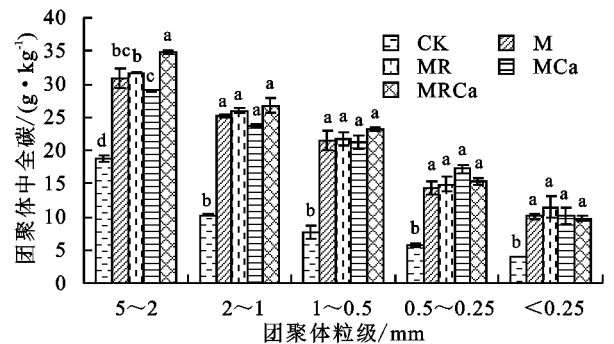


图 2 不同处理土壤各粒级团聚体中的全碳含量

2.4.2 土壤全碳在各粒级团聚体中分配 由图 3 可知,总体上看,各处理土壤碳均主要分布在<0.25 mm 的微团聚体上。添加稻草或生石灰均能提高>0.25 mm 团聚体中的碳对土壤全碳的贡献率,>0.25 mm 大团聚体中碳含量在土壤全碳的贡献率表现为 MR>MRCa>MCA>M>CK,<0.25 mm 微团聚体则表现出相反的规律。MRCa 处理 5~2 mm 粒级碳贡献率高于其他各处理,而对于 2~1,1~0.5,0.5~0.25 mm 粒级碳贡献率来说,MR 处理最高。MCA 处理较 M 处理相比>0.25 mm 的各粒级团聚体碳贡献率均有所增加。

2.5 团聚体组成与土壤全碳、团聚体稳定性的相关性

团聚体的组成可反映土壤结构的好坏,且与土壤碳含量之间存在着密切的联系。通过对团聚体组成与土壤全碳、团聚体稳定性之间的相关性分析表明(表 5),土壤全碳含量与 5~2,2~1,1~0.5 mm 粒级的含量呈显著正相关,与<0.25 mm 粒级的含量呈显著负相关。MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 均与>0.25 mm 的各粒级团聚体含量显著正相关,与<0.25 mm 粒

级含量呈显著负相关。

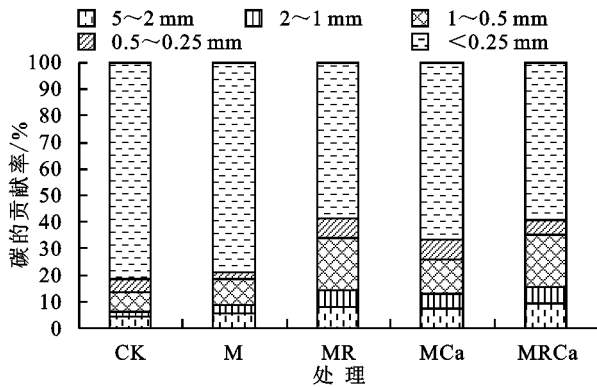


图3 各粒级团聚体中碳含量对土壤全碳的贡献率

表5 各粒级团聚体组成与土壤全碳、团聚体稳定性的相关性

团聚体粒级/mm	土壤全碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	MWD	GMD	$R_{0.25}$
5~2	0.668**	0.943**	0.882**	0.887**
2~1	0.675**	0.978**	0.969**	0.967**
1~0.5	0.613*	0.938**	0.970**	0.954**
0.5~0.25	0.265	0.674**	0.679**	0.729**
<0.25	-0.613*	-0.985**	-0.997**	-1.000**

3 讨论

3.1 稻草、生石灰对土壤水稳性团聚体组成及稳定性的影响

本试验中,鸡粪+稻草+生石灰可显著促进5~2 mm大团聚体的形成,而鸡粪+稻草可显著促进2~1, 1~0.5, 0.5~0.25 mm团聚体的形成,并减少<0.25 mm团聚体的含量(表3)。已有研究^[16]表明,无论是大田土壤还是设施土壤,秸秆还田均会显著影响团聚体的分布情况,增加大团聚体的百分含量,这与本试验结果一致。主要由于添加作物秸秆可以促进作物生长,进而刺激微生物的活动,微生物活动产生的代谢产物具有促进大团聚体形成的胶结作用^[8]。加入生石灰对5~2 mm大团聚体的形成具有显著的促进作用(表3)。钙离子作为土壤团聚体胶结物质之一,可提高阴阳离子的结合,增加土壤中离子间的相互作用,进而促进大团聚体的形成^[8]。Aye等^[17]研究表明,在进行了5年的定位试验中,加入生石灰会显著增加>0.25 mm大团聚体的含量,与本试验结果一致。整体来看,<0.25 mm微团聚体所占比例最高,可能是因为长期连作导致土壤结构退化,大团聚体破碎为微团聚体所致。

鸡粪+稻草可提高团聚体的稳定性(表4)。Rahman等^[18]通过对添加秸秆的0~20 cm土层团聚体的研究表明,添加秸秆会对大团聚体的形成产生显著影响,对于微团聚体的形成无显著作用。而MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 均与>0.25 mm各粒级团聚体含量显著正相关(表5),因而添加秸秆可增加MWD、

GMD、 $R_{0.25}$,提高团聚体的稳定性。本试验中,在鸡粪基础上加入生石灰,可提高MWD、GMD、 $R_{0.25}$ (表4)。Briedis等^[19]研究发现,施入生石灰,可增加MWD,提高团聚体的稳定性,这与本试验结果一致。尽管施入生石灰可在数值上提高MWD、GMD和 $R_{0.25}$,但通过多因素方差分析发现生石灰并未对稳定性评价指标产生显著影响。而稻草与生石灰的交互作用会显著提高MWD、GMD和 $R_{0.25}$,对水稳性团聚体的稳定性有积极促进作用(表4)。

3.1 稻草、生石灰对土壤各粒级团聚体全碳含量及其分配的影响

本试验中,施入稻草或生石灰均可增加土壤全碳含量,稻草和生石灰同时施入土壤全碳含量增加最显著(图1)。已有研究^[20]表明,土壤的固碳能力对于减缓气候变化、保持土壤肥力、改善土壤质量和结构具有重要的作用。秸秆还田作为一种重要的管理手段,可使有机胶体与矿物质相结合,使微团聚体向大团聚体转化,同时增加土壤全碳的输入量,减少全碳的矿化分解,进而提高土壤全碳含量^[21]。而加入生石灰后可改善土壤结构,增加土壤的稳定性,提高了土壤的固碳能力,同时施入生石灰后改变了土壤的pH,促进了植物的生长,增加了根系微生物的活动,微生物活动产生的代谢物质为土壤带来更多的碳^[22]。

本试验中,土壤团聚体中碳含量随着粒级的增大而增加,这与Tisdall等^[23]的研究结果一致。但Bidisha等^[24]研究发现,在长期施入有机物料后,<0.25 mm粒级中的碳含量最高。产生差异的原因主要有3点:(1)翻耕方式不同。机械翻耕严重破坏了大团聚体,使其养分消耗。而本试验采用人力翻耕,与机械翻耕相比,对大团聚体的破坏较小。(2)试验环境不同。本试验在温室内进行,已有研究^[25]发现,日光温室土壤团聚体的水稳性要高于露地土壤。(3)长期施用有机物料使更多的有机碳进入大团聚体。本试验表明,稻草与生石灰同时施入可显著增加5~2 mm大团聚体中的全碳含量,提高2~1, 1~0.5 mm团聚体中碳含量(图2)。秸秆还田可以改变土壤全碳的分布,增加团聚体中的全碳含量,特别是大团聚体中的全碳含量^[26-27],这与本试验结果一致。此外,鸡粪+生石灰处理使5~2, 2~1, 1~0.5 mm大团聚体中全碳含量下降,而在0.5~0.25, <0.25 mm团聚体中全碳含量却有所升高(图2)。主要是由于生石灰通过改变土壤的pH增加微生物对碳的利用率,大团聚体中的碳被分解消耗,一些难以被微生物利用的碳被小粒级团聚体包裹储存,以此来保证土壤碳库的稳定^[17]。本试验中,土壤全碳主要分布在<0.25 mm的微团聚体上(图3),这与苏慧清等^[27]的研究结果一致。这

主要与该粒级所占比例较大有关,团聚体有机碳对全碳的贡献由团聚体的组成与碳含量共同决定。

3.3 各级团聚体组成与土壤全碳和团聚体稳定性之间的相关性分析

邢旭明等^[28]通过对长期定位施肥的棕壤团聚体组成与土壤养分之间的相关性分析表明,土壤有机碳、全氮、全磷均与 >2 mm 团聚体呈显著正相关,而与 <0.25 mm 团聚体呈显著负相关,主要由于大团聚体对于养分的储存功能明显强于微团聚体。本试验中,土壤全碳含量与 >0.5 mm 团聚体含量呈显著正相关,与 <0.25 mm 微团聚体含量呈显著负相关(表 5),与邢旭明等^[28]的研究结果基本一致。团聚体稳定性主要与 >0.25 mm 团聚体含量显著正相关,表明大团聚体对于改善土壤结构、提高土壤团聚化程度具有积极的作用,而 <0.25 mm 团聚体含量越多,则土壤结构越差。

4 结论

对于设施栽培土壤,在施入鸡粪的基础上加入稻草或生石灰,均可促进 >0.25 mm 团聚体的形成,降低 <0.25 mm 团聚体的含量,增加土壤全碳含量,提高团聚体的稳定性,提高 >0.25 mm 团聚体中碳在土壤全碳中的贡献率。且稻草与生石灰同时添加,效果更佳。在设施栽培条件下,可以通过适量添加稻草等有机物料或者生石灰缓解因长期连作而导致的土壤结构劣变问题,为设施内土壤可持续利用提供保障。

参考文献:

- [1] 郭文忠,刘声锋,李丁仁,等. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J]. 土壤,2004,36(1):25-29.
- [2] Bast A, Wilcke W, Graf F, et al. A simplified and rapid technique to determine an aggregate stability coefficient in coarse grained soils [J]. Catena, 2015, 127: 170-176.
- [3] 向艳文,郑圣先,廖育林,等. 长期施肥对红壤水稻水土稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(7):2415-2424.
- [4] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 1-12.
- [5] 王仁杰,强久次仁,薛彦飞,等. 长期有机无机肥配施改变了壤土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. 中国农业科学,2015,48(23):4678-4689.
- [6] 赵明,陈雪辉,赵征宇,等. 鸡粪等有机肥料的养分释放及对土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J]. 中国生态农业学报,2007,15(2):47-50.
- [7] 张亚丽,吕家珑,金继运,等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(2):307-314.
- [8] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil & Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [9] 孙天聪,李世清,邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(9):1841-1848.
- [10] 聂军,郑圣先,杨曾平,等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(7):1404-1413.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [12] Yoder R E. A Direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28(5): 337-351.
- [13] Bavel C H M V. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [14] Mazurak A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates [J]. Soil Science, 1950, 69(2): 135-148.
- [15] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报,2006,26(2):364-372.
- [16] 李增强,李丹丹,赵炳梓,等. 秸秆施用和作物种植对土壤团聚体和微生物群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报,2017,36(8):1557-1565.
- [17] Aye N S, Sale P W G, Tang C. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils [J]. Biology & Fertility of Soils, 2016, 52(5): 697-709.
- [18] Rahman M T, Guo Z C, Zhang Z B, et al. Wetting and drying cycles improving aggregation and associated C stabilization differently after straw or biochar incorporated into a Vertisol [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 28-36.
- [19] Briedis C, Sá J C D M, Caires E F, et al. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system [J]. Geoderma, 2012, 170(1): 80-88.
- [20] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, et al. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation [J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 653.
- [21] Dikgwatlhe S B, Chen Z D, Lal R, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat - maize cropping system in the North China Plain [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144(4): 110-118.

- Effect. Florida: CRC Press, 1995: 41-59.
- [11] 逢好胜. 大兴安岭南坡植被退化对土壤微生物群落多样性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [12] 连树清, 王辉, 马维伟. 尕海湿地泥炭土土壤理化性质[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(3): 128-132.
- [13] 刘帆, 刘晖, 徐凌霄, 等. 青藏高原东部尕海湿地种子库沿水位梯度的分布格局[J]. 科学通报, 2013, 58(14): 1332-1339.
- [14] 马维伟, 王辉, 王跃思, 等. 甘南尕海泥炭沼泽地退化过程土壤特征和水源涵养功能的变化[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1531-1541.
- [15] 黄蓉, 王辉, 马维伟, 等. 尕海洪泛湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 221-227.
- [16] 魏文彬, 李婷, 李俊臻. 尕海湿地生态系统的保护与管理[J]. 湿地科学与管理, 2010, 6(3): 32-34.
- [17] 马维伟, 王辉, 李广, 等. 甘南尕海湿地不同植被退化阶段土壤有机碳含量及动态[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 254-259.
- [18] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [19] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度对大针茅草原土壤全土及轻组碳氮储量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 101-106, 207.
- [20] 林丽, 曹广民, 李以康, 等. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草沼泽化草甸碳过程的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [21] 刘育红, 魏卫东, 温小成, 等. 三江源退化高寒草原土壤有机碳组分分布研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1370-1376.
- [22] 王文颖, 王启基, 鲁子豫. 高寒草甸土壤组分碳氮含量及草甸退化对组分碳氮的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(5): 647-654.
- [23] 蔡晓布, 彭岳林, 于宝政, 等. 不同状态高寒草原主要土壤活性有机碳组分的变化[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 315-323.
- [24] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土粒团聚的关系[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 70-77.
- [25] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2669-2677.
- [26] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2): 298-311.
- [27] Barrios E, Buresh R J, Sprent J I. Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(2): 185-193.
- [28] 李洁, 盛浩, 周萍, 等. 亚热带丘陵几种林地土壤剖面有机碳和轻组有机碳的分布[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 851-857.
- [29] 谢锦升, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 557-563.
- [30] Barrio E, Kwesiga F, Buresh R J, et al. Light fraction soil organic matter and available nitrogen following trees and maize [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 826-831.
- [31] 马维伟, 王辉, 王修华, 等. 甘南尕海不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 194-198, 220.
- [32] Jobbag E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [33] 黄小娟, 郝庆菊, 吴艳. 紫色水稻土轻组有机质的季节动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1579-1585.
- [34] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290-297.
- (上接第204页)
- [22] Verchot L V, Dutaour L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. Geoderma, 2011, 161(3/4): 182-193.
- [23] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [24] Bidisha M, Joerg R, Yakov K. Effects of aggregation processes on distribution of aggregate size fractions and organic C content of a long-term fertilized soil [J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(6): 365-370.
- [25] 孙艳, 王益权, 刘军, 等. 日光温室蔬菜栽培对土壤团聚体稳定性的影响: 以陕西省泾阳县日光温室土壤为例[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 168-174.
- [26] Guan S, Dou S, Chen G, et al. Isotopic characterization of sequestration and transformation of plant residue carbon in relation to soil aggregation dynamics [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96(3/4): 18-24.
- [27] 苏慧清, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 924-932.
- [28] 邢旭明, 王红梅, 安婷婷, 等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 267-273.